المحاضرة السابعة

مخطط الاتزان الحراري للحديد والكربون:
مخطط الحديد والكربون

قبل التكلم عن مخطط الاتزان الحراري للحديد والكربون يجب أولا معرفة ماذا يعني كلمة طور

الطور :

يعرف الطور بأنه جزء من المادة متجانس له خواص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية المميزة. مثال لذلك الثلج في الماء هما طوران لأنه يمكننا تمييز الماء عن الثلج رغم أن لهما نفس التركيب الكيميائي بينما النسكافيه فهي طور واحد رغم احتوائها على عدة عناصر (قهوة – سكر – حليب – ماء) إلا أنها امتزجت مع بعضها بحيث لا يمكن تمييز هذه العناصر وأصبحت طوراً واحداً أسمه نسكافيه.

يبين الشكل مخطط الاتزان الحراري للحديد والكربون ونلاحظ في الشكل ما يلي:

- عند درجة حرارة الغرفة هناك طوران هما فريت (ferrite) أما الطور الأخر فهو (Fe_3C) وهو غني بالكربون ويسمى سيمنتيت (Cementite) أو في بعض الأحيان يسمى كربيد (Carbide) ونسبة الكربون فيه 6.7% وهى أقصى نسبة كربون يمكن إذابتها في الحديد.
- طور الفريت به نسبة قليلة جداً من الكربون وتركيبية البلوري (الخلية الوحدية له) هو BBC وعند تسخينه يحدث له تغير إلى الطور الأوستنيت . (Austenite) وإذا اعتبرنا الحديد النقي ، فإن هذا التغير يحدث عند درجة حرارة 911 درجة مئوية وهذا الطور الأوستنيت له تركيب بلورى. FCC
- يتحول الحديد النقي مرة ثانية من الأوستنيت إلى طور يسمى فريت عند درجة حرارة 1401 درجة مئوية ويعود هذا الطور مرة أخرى إلى التركيب البلوري . BCC تسمى هذه العملية بالبولي مورفيسم (Polymorphism). ويعرف البولى مورفيسم بأنه قابلية المادة بالتواجد بأكثر من تركيب بلوري.
- الكربون يعتبر كمذاب في الحديد وهو يكون كذرة غريبة مقحمة (شوائب) . الأماكن التي تجدها ذرات الكربون كذرات مقحمة في ال FCC أكثر من ال BCC) رغم أن معامل الازدحام في ال FCC أكثر من الـ BCC) وهذا يعلل أن نسبة الكربون في الأوستنيت (FCC) أكبر من نسبة الكربون في الفريت (BCC) .
- لأن الطور فريت هو طور مستقر عند درجات حرارة عالية جداً لذلك فإنه ليست له قيمة عملية.
- من ناحية الخواص الميكانيكية فالسيمنتيت (كربيد) صلب جداً وقصف جداً وتتحسن خواص الصلب بإضافة نسب منه.
- في الشكل الموضح نلاحظ أن هناك ثلاث نقاط ثلاثية الأطوار:

1- نقطة يوتيكتيك عند تركيب 4.3% كربون ودرجة حرارة 1147 درجة مئوية.
2- نقطة يوتيكتويد عند تركيب 0.8% ودرجة حرارة 723 درجة مئوية.
3- نقطة بريتكتيك عند تركيب 0.18% ودرجة حرارة 1493 درجة مئوية.

إذا مخطط الحديد والكربون أو مخطط أطوار الحديد والكربون (بالإنجليزية:Iron-carbon phase diagram)

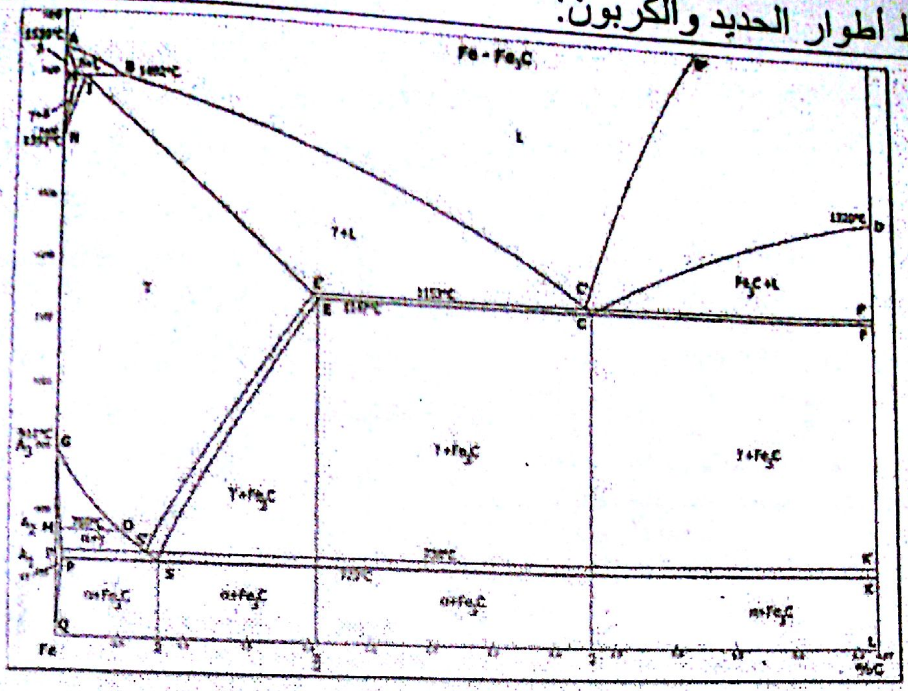
توجد في سبائك الحديد (وهي الفولاذ و الحديد الزهر) دائما نسبة صغيرة من الكربون ، وهي التي تحدد خصائص الفولاذ وخصائص الحديد الزهر . ومخطط أطوار الحديد والكربون هو رسم بياني يبين أطوار الحديد والتوازن بينها كمخطط ثنائي للحديد والكربون . وهو يبين اعتماد الأطوار الناتجة للحديد على درجة الحرارة وعلى كمية الكربون الموجودة في كل طور .

يشكل الكربون أهم الإضافات التي تدخل في صناعة سبائك الحديد، وأي تغير في نسبة الكربون وإن كانت صغيرة فلها تأثير كبير على صفات سبيكة الحديد. ويقل ما نستنتجه من مخطط الحديد والكربون كلما كانت سرعة التبريد أو التسخين عالية ، أو كلما زادت نسبة المواد المكونة للسبيكة.

يمثل مخطط الحديد والكربون في شكلين: نظام شبه المستقر (حديد – كربيد الحديد) (Fe_3C -Fe) وفيه يكون الكربون مرتبطا كذرات في البنية الحديدية، ونظام مستقر (Fe-C) يكون الكربون فيه حبيبيا في هيئة غرافيت. وفي التقنية العملية يستخدم عادة النظام Fe_3C-Fe الشبه مستقر.

Scanned by CamScanner

مخطط أطوار الحديد والكربون:



مخطط أطوار الحديد والكربون

تقسيمات تقريبية:

يبين المحور الأفقي نسبة الكربون في الحديد (النسبة الكتلية) ، ويبين المحور الرأسي درجة الحرارة. ويوضح هذا الرسم البياني نسب الكربون في الحديد بين 0 - 6,67 % وهي المهمة عمليا (ولا يوجد سبائك حديد بنسب كربون أعلى من ذلك سوى كسبائك أولية) ، عندما تكون نسبة الكربون 6و67 % أو أكبر فهي تشكل سبيكة سمنتيت ، أحد أنواع سبائك الحديد.

توصل الخطوط في المنحنى بين نقاط تثبت فيها درجة الحرارة وتفصل الخطوط أطوار الحديد عن بعضها البعض .
بعض النقاط المهمة تميز بحروف كتابية ، وفي بعض الرسوم البيانية يرمز للنقطة I بدلا من J .

يبين الخط ABCD الحد الفاصل بين الحالة السائلة والحالة الصلبة ، حيث تكون السبيكة في درجات حرارة أعلى منه في الحالة السائلة . والخط AHIECF يمثل الحد الفاصل للطور الصلب ، وتحت هذا الخط تتصلب السبيكة . وبين هذين الخطين تكون السبيكة في حالة هلامية متكونة من حالة سائلة و حديد دلتا δ و حديد جاما γ و سمنتيت (Fe_3C) في مختلف التركيزات وكمياتها . وعند تبريد السبيكة تحت خط السائل يبدأ التبلور الابتدائي من المصهور.

بسبب خاصية تأصل الحديد تتكون أطوارا مختلفة له تختلف حسب نسبة الكربون الموجودة فيه . ويكوّن الحديد بلورات مختلفة مختلطة δ و γ و α ذات نسب مختلفة من الكربون . ويكون توزيع الذرات في وحدات خلايا مختلفة وأطول الخلايا البلورية تكون مختفة أيضا. التسميات التقنية للمخلوطات البلورية هي : δ فريت للمخلوط البلوري δ، و أوستنيت للمخلوط البلوري γ ، و فريت للمخلوط البلوري α.

Scanned by CamScanner

تقسيمات تقريبية:

- المصهور : وهو السبيكة السائلة للحديد والكربون . وتكون السبيكة سائلة بكاملها فوق خط السيولة . وبين خطي السيولة وخط التصلب تكون السبيكة سائلة جزئيا .
- δ-Ferrit (دلتا فريت): يكون متبلورا في نظام بلوري مكعب مركزي الجسم
- أوستنيت (مخلوط بلوري γ): يكون متبلورا في نظام مكعب مركزي الوجه
- α-Ferrit (فريت ألفا): نظام بلوري مكعب مركزي الجسم
- غرافيت (نظام مستقر) أو سمنتيت (C_3Fe؛ نظام شبه مستقر)

في البرليت وفي الليديبوريت فهما لا يشكلان أطوارا نقية وإنما بنيتهما عبارة عن مخلوطات أطوار . وهما ينشآن في أنظمة مستقرة أو شبه مستقرة عند تبريدهما ببطء. ومن وجهة أخرى ينشأ عند التبريد السريع (مثل السقاية في الماء) للأوستنيت فيتحول إلى مارتنسيت. المارتنسيت له بنية شديدة الصلابة ويكون هشا.

توجد للنظام شبه المستقر نقاط ، وخطوط ، وظواهر خصوصية:

- **نقاط خصوصية:** نسبة الكربون ودرجة الحرارة عند كل نقطة من الخطط:

A: (0 % carbon /1536 °C) , B: (0,5 %/1493 °C) , C: (4,3 %/1147 °C) ,
D: (6,67 %/1320 °C) , E: (2,06 %/1147 °C) , F: (6,67 %/1147 °C) ,
G: (0 % / 911 °C) , H: (0,1 %/1493 °C) , I: (0,18 %/1493 °C) ,
K: (6,67 %/723 °C) , N: (0 %/1401 °C) , P: (0,025 %/723 °C) ,
S: (0,83 %/723 °C) , Q: (0,008 %/20 °C) , M: (0 %/769 °C) ,
S': (0,69 %/738 °C) , E': (2,03 %/1153 °C) , C': (4,25 %/1153 °C)

- **خطوط خصوصية:**

خط السيولة: A-B-C-D خط التصلب: A-H-I-E-C-F

Eutektikale: E-C-F Eutektoide: P-S-K Peritektikale: H-I-B

- **ظواهر خصوصية:**
  - Eutektikum يوتيكتيكة : 4,3 % bei 1147 °C (النقطة C)
  - Eutektoid يوتيكتويد : 0,8 % bei 723 °C (النقطة S)
  - Peritektikum بريتيكتيكة : 0,18 % bei 1493 °C (النقطة I)

Scanned by CamScanner

إذا وكما هو موضح في الشكل (2-24) مخطط التوازن الحراري بين عنصري الحديد والكربون لغاية 6.67% كربون وهي النسبة العملية لهذه السبيكة حيث يتكون الكاربون الحر (الغرافيت) أو المركب الكيمياوي كربيد الحديد Fe_3C . ولغرض تسهيل دراسة هذا المخطط سنجزئه الى ثلاثة أجزاء وحسب درجات الحرارة.

الجزء الخاص بالتفاعل البريتكتيكي:

ويتكون هذا الجزء عند درجة حرارة 1493 °م كما موضح في الشكل (2–24)
فاذا أخذنا سبيكة تحتوي على 0.18% كاربون سيحدث التجمد عند درجات الحرارة مابين (1518 – 1497) °م حيث يتكون الطور δ ، وعند درجة 1443 °م يوجد هذا الطور والسائل بالمقدارين الآتيين:

الطور $\delta = \frac{0.18-0.5}{0.1-0.5} \times 100\% = 80\%$ محلول جامد

الطور السائل $= \frac{0.1-0.18}{0.1-0.5} \times 100\% = 20\%$ محلول سائل

ويحدث التفاعل الحولي في درجة حرارة 1493 °م وحسب المعادلة الآتية:

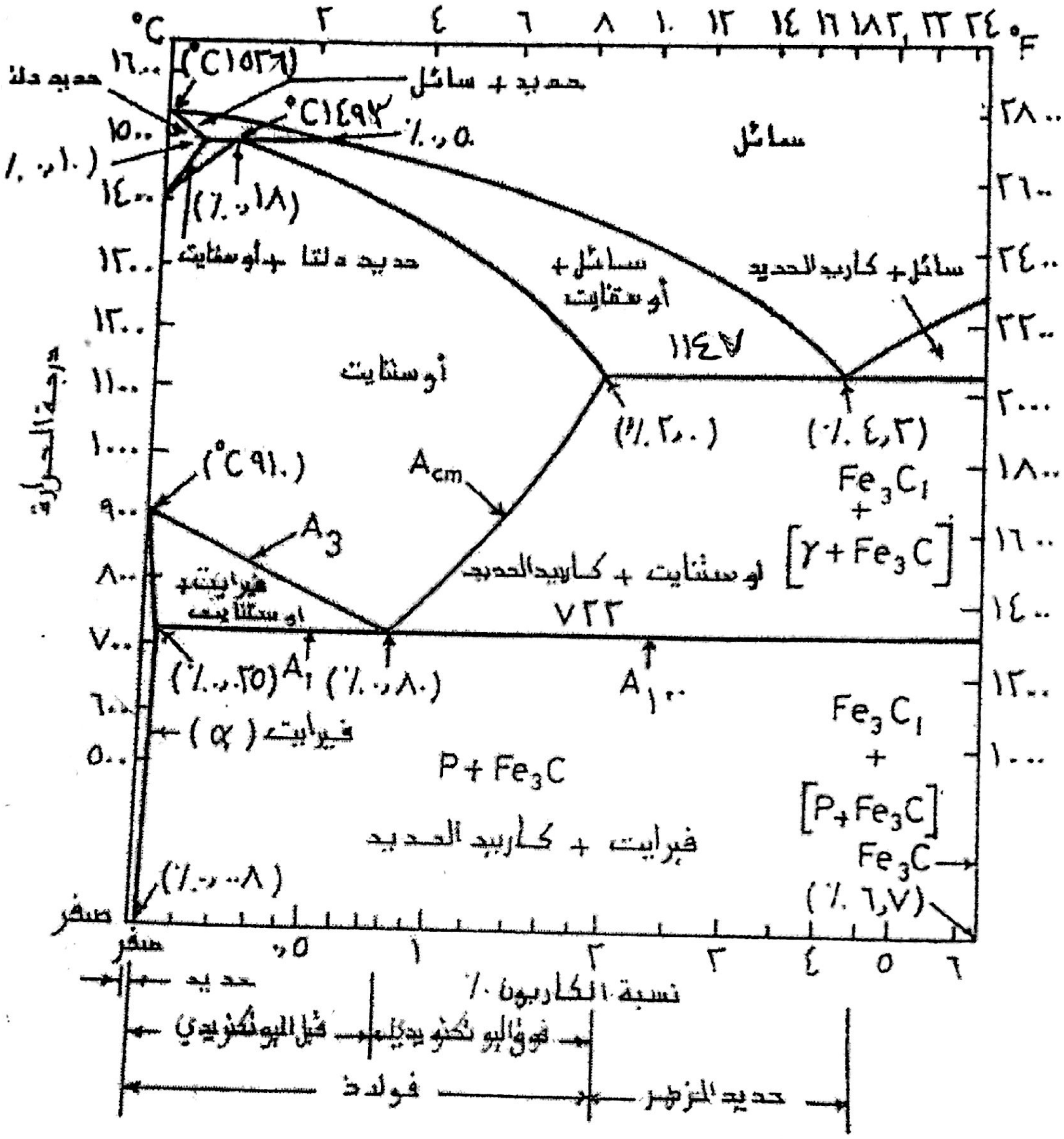
$$\underset{0.1\%C}{\delta} + \underset{0.5\%C}{L} \xrightarrow{1493^{o}C} \underset{0.18C}{\gamma}$$

أي سنحصل على الطور الجديد (γ) بتركيب 0.18% كاربون من تفاعل السائل الذي يحتوي على 0.5% كاربون مع الطور δ الحاوي على 0.1% كاربون.

اما السبيكة الحاوية على 0.14% كاربون فاننا سنحصل على (δ) عند التبريد البطيء من الحالة السائلة الى درجة حرارة 1496 °م ، ويحتوي النظام على 10% سائل تركيبه 0.5% كاربون و 90% محلول جامد من (δ) بتركيب 0.1% كاربون. ويتفاعل جميع السائل مع جزء من δ لنحصل على الطور (γ) في درجة حرارة التفاعل الحولي 1493 °م في ظروف التبريد المتوازن. ويتكون الناتج عند درجة حرارة مباشرة تحت 1493 °م من الطور (δ) بتركيب 0.1% كاربون مع الطور (γ) بتركيب 0.18% كاربون، وعند الهبوط بدرجة الحرارة فإن الطور (δ) سيختفي ليظهر بدلاً منه الطور (γ).

اما السبيكة الحاوية على 0.34% كاربون فانها تتألف من الطور (δ) والسائل عند درجة 1497 °م ويكون 60% منه سائلاً والباقي من طور (δ) الجامد.
وعند درجة الحرارة 1493 °م يتفاعل جزء من السائل مع كل من الطور (δ) لإنتاج طور (γ) بتركيب 0.18% وذلك عندما يكون التبريد متزناً، ويتكون الناتج عند درجة حرارة دون 1493 °م بقليل من نصفين نصف من الطور السائل ونصف من الطور (γ)، ثم يختفي الطور السائل ليظهر بدلا منه الطور (γ) عندما تهبط درجة الحرارة.

Scanned by CamScanner



الشكل (٢ - ٢٤) الاتزان الحراري للحديد - كربون

Scanned by CamScanner

لقد لاحظنا بصورة عامة أن الطور (δ) وهو محلول جامد من الحديد والكاربون، ونسبة الكاربون فيه لاتتعدى 0.1% وقد تكوّن في درجات حرارية ما بين 1536 °م – 1401 °م.

[δ = Fe (c), C ≤ 0.1% , T° (1401-1538)]

2. **الجزء الخاص بالتفاعل اليوتكتيكي :–**

أ. **سبيكة قبل اليوتكتك :**

اذا تأملنا سبيكة تحتوي على 3% كاربون بردت من درجة 1370 °م فسنلاحظ حسب الشكل (2–24) أن الطور (γ) يبدأ بالتجمد عند درجة 1300 °م ويستمر بالتجمد حتى تصل درجة الحرارة الى 1147 °م . وعند هذه الدرجة يكون تركيب السبيكة 50% طور صلب من (γ) و 50% طور ذو تركيب يوتكتك [γ + Fe_3C] الذي ندعوه باللديبيوريت (Led).

$$\gamma + L \xrightarrow{1147\ ^\circ C} \gamma + [\gamma + Fe_3C]$$

وعليه فان البنية عند هذه الدرجة تتكون من 85.1% من الطور (γ) ذو التركيب اليوتكتويدي (0.8% كاربون) و 14.9% من السمنتايت Fe_3C.

ان الطور (γ) ذا التركيب اليوتكتويدي سرعان ما يتحول الى الخليط اليوتكتويدي عند درجة 723 °م مكونا بنية من الطور ألفا (α) والسمنتايت Fe_3C وبنسب 88% و12% على التوالي.

ونجد هذا واضحا في مخطط الشكل (2–24) ويتكون هنا الطور (γ) قبل أن يتكون اليوتكتك، وهو طور يحتوي على 2% كاربون، وعندما تنخفض درجة الحرارة وببطء من 1147 °م فان قابلية ذوبان الكاربون في (γ) ستقل وحسب الخط Acm بحيث تصبح النسبة 0.8% كاربون عند درجة الحرارة 723 °م تقريبا،

ب. **سبيكة اليوتكتك :**

اذا تأملنا اليوتكتك الحاوية على 4.3% كاربون عند درجة حرارة 1147 °م فسنلاحظ أن هذه السبيكة ستتحول الى خليط يوتكتيكي فيه 47.7% من الطور (γ) اليوتكتيكي و 52.3% من السمنتايت وحسب المعادلة

$$L \xrightarrow{1147\ ^\circ c} [\gamma + Fe_3C]$$

Scanned by CamScanner

ويحتوي طور (γ) اليوتكتيكي على 2% كاربون عند هـذه الدرجـة ولكـن سرعان ما تقل هذه النسبة عند هبوط درجة الحرارة لتصبح 0.8% كاربون عند درجة 723 ^{o}م تقريباً.

وسرعان ما يتحول الطـور (γ) ذو التركيب اليوتكتويدي (0.8% كاربون) عند درجة 723 ^{o}م الى الخليط اليوتكتويدي مكونـا بنيـة مـن الطـور الفـا (α) والسمنتايت $[\alpha + Fe_3C]$ والذي ندعوه بالبيرلايت p

ج. <u>سبيكة فوق اليوتكتك</u> :-

عند تبريد السبائك المحتوية على نسب بين 4.3%-6.67% من الكاربون فان بنيتها ستتكون من سمنتايت أولي Fe_3C_I وسائل عند درجات حـرارة أعلـى مـن 1147 ^{o}م ، أما عند هذه الدرجة فان البنية ستتكون من السمنتايت الأولـي وخلـيط يوتكتيكي اللديبيوريت $[\gamma + Fe_3C]$

$$Fe_3C_I + L \xrightarrow[\text{تفاعل يوتكتيكي}]{1147^oC} Fe_3C_I + [\gamma + Fe_3C]$$

فالسبيكة الحاوية على 5% كاربون مثلاً ستتكون بعـد التجمـد عنـد درجـة 1147 ^{o}م من خليط يوتكتيكي بنسبة :

$$\%70.46 = \%100 \times \frac{5-6.67}{4.3-6.67}$$

ومن السمنتايت الأولي بنسبة :

$$\%29.54 = \%100 \times \frac{4.3-5}{4.7-6.67}$$

أما عند درجـة 723 ^{o}م فان بنيـة السبيكـة ستتكون من Fe_3C_I الأولـي وخليـط يوتكتويـدي من $[\alpha + Fe_3C]$. لقد لاحظنا في الجزء الخـاص بالتفاعـل اليوتكتيكي ظهور المركب الكيمياوي Fe_3C_I وهو مركب صلد يتكـون مـن إتحـاد الحديد مع الكاربون، ويوجد أما بصورة منفصلة على شكل شبكة في مناطق حدود الحبيبات او ان يدخل في تركيب الخليط اليوتكتويدي (البيرلايت). ولاحظنا كـذلك ظهور الطور (γ) وهو محلول جامد من الحديد والكاربون تكون نسبة الكـاربون فيه لاتتعدى 2% ويظهر في درجات حرارية مابين 1400 – 910 ^{o}م ، وقد اتفـق على تسميته حديد گاما او حديد الاوستنايت نسبة للعالم روبرت أوستن.

Scanned by CamScanner

3. **الجزء الخاص بالتفاعل اليوتكتويدي :-**
يعرف اليوتكتويد بانه مزيج ميكانيكي متلاحم يتكون من طورين او اكثر وله تركيب معين ودرجة حرارة تحول معينة في الحالة الصلبة. واليوتكتويد الخاص بنظام الحديد – الكاربون يتكون عندما تكون نسبة الكاربون 0.8%، ويتكون اثناء التبريد في ظروف الاتزان وعند درجة 723 °م، ويتكون من مزيج ميكانيكي متعاشق من الفرايت والسمنتيت على شكل شرائح ويظهر تحت المجهر على شكل يشبه اللؤلؤ لذا أطلق عليه الشكل اللؤلؤي (بيرلايت) شكل (2–25أ)، فالسبائك التي تحتوي على نسبة من الكاربون أقل من 0.8% (سبائك قبل اليوتكتويدي) تتجمد على النمط الذي ذكرناه في الجزء الخاص بالتفاعل الحولي من مخطط الحديد – الكاربون، حيث يتكون الطور (γ) عند درجة حرارة 1400 °م تقريبا. وباستمرار التبريد فانه لا يلاحظ تغيير طوري حتى نصل الى الخط A_3 وعنده تظهر منطقة ذات طورين هما الطور α والطور γ ، وعليه فان α يبدأ بالتكون عند درجة الحرارة المناظرة لهذا الخط، ويستمر بالتكون حتى تصل درجة الحرارة الى 723 °م حيث يتحول الطور (γ) المتبقي الذي يحتوي على 0.8% كاربون الى خليط يوتكتويدي من [$\alpha + Fe_3C$] الذي ندعوه البيرلايت، واذا استمرت عملية التبريد فلن يكون هناك تحول آخر باستثناء احتمال انفصال بعض من السمنتايت الثالث Fe_3C_{III} من الفيرايت α لان ذوبان الكاربون في الفيرايت يتناقص من 0.025% كاربون الى 0.0025% كاربون في درجة حرارة المختبر وعليه فان البنية المتكونة لهذه السبائك هي عبارة عن فيرايت + برلايت كما موضح في الشكل (2–25أ).

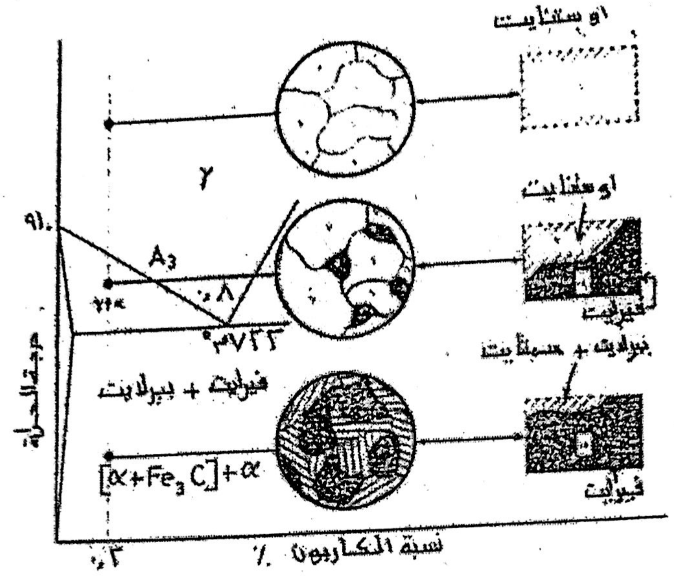
اما السبائك الحاوية على اكثر من 0.8% كاربون كما في الشكل (2–25ب) (سبائك فوق اليوتكتويدي) فانها ستتجمد حسب النمط الآتي:
تنفصل بلورات من الطور (γ) أولا عند بلوغ الحرارة المناظرة لخط السيولة، وعند بلوغ درجة الحرارة المناظرة لخط الانجماد يستكمل بقية المنصهر تجمده مكونا المحلول الجامد من الطور (γ) الاوستنايت، وباستمرار عملية التبريد فانه لايلاحظ حدوث أي تغيير طوري حتى تصل درجة الحرارة الى الخط Acm وعنده تظهر منطقة تحتوي على السمنتايت الثانوي Fe_3C_{II} والطور (γ) شكل (2–25ب) ومع انخفاض درجة الحرارة 723 °م فان المتبقي من الطور (γ) الذي يحتوي على 0.8% من الكاربون سوف يتحول الى الخليط اليوتكتويدي [$\alpha + Fe_3C$] وحسب المعادلة الآتية:

$$\gamma + Fe_3C_{II} \xrightarrow{723^{o}C} Fe_3C_{II} + [\alpha + Fe_3C]$$

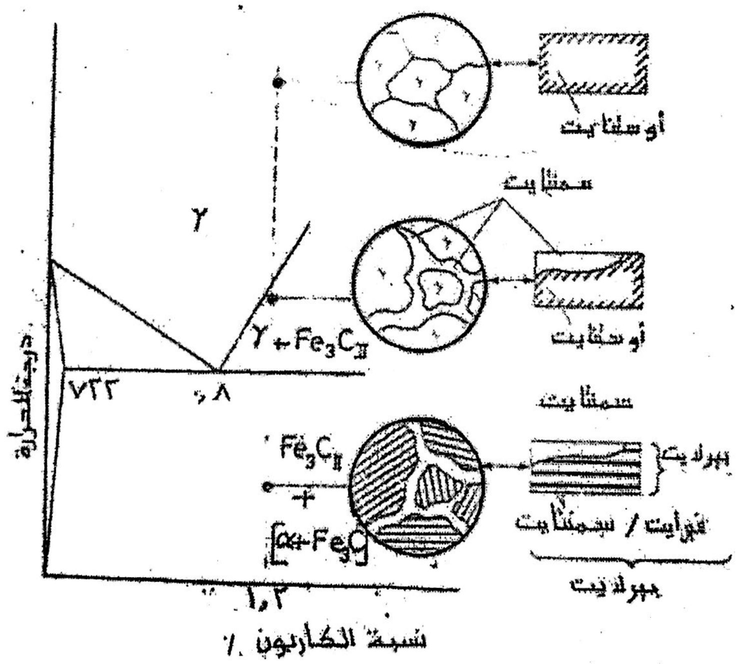
ان الطور α الذي ظهر في هذا الجزء من المخطط هو سبيكة من الحديد والكاربون لاتتعدى فيه نسبة الكاربون 0.025% ويظهر في درجات حرارية أقل من 910 °م ، وقد اتفق على تسميته الطور الفا او بحديد الفيرايت نسبة للعالم فيري.
اما البيرلايت فهو بنية يوتكتويدية تحتوي على طبقات رقائقية متعاقبة من الفيرايت (α) والسمنتايت Fe_3C ، ويحتوي البيرلايت على نسبة من الكاربون مقدارها 0.8%، وهو يتكون من تحول الاوستنايت (γ) الى فيرايت وسمنتايت حسب المعادلة الآتية:

$$\gamma \xrightarrow{723^{o}C} [\alpha + Fe_3C]$$

Scanned by CamScanner



الشكل (2-25أ) مخطط الحديد - الكاربون لسبيكة تحتوى على 0,3 %كربون



الشكل (2-25ب) مخطط الحديد - الكاربون لسبيكة تحتوى على 1,2 %كربون

Scanned by CamScanner

مثال (1) :-

فولاذ قبل اليوتكتويدي يحتوي على 0.3% كاربون وتتركب بنيته مـن α والخلـيط اليوتكتويدي [$\alpha+Fe_3C$] ، المطلوب تحديد كمية α والخلـيط اليوتكتويـدي لهـذا الفـولاذ. [يمكن اهمال احتواء الفيرايت على الكاربون بنسبة 0.025% في الحسابات العملية].

الحل :-

بالاستعانة بالشكل (2-25 أ) وبتطبيق قاعدة الذراع نحصل على :

$$\%62.5 = \%100 \times \frac{0.3-0.8}{0.6-\text{صفر}} = \alpha$$

$$\%37.5 = \%100 \times \frac{0.3-\text{صفر}}{0.8-\text{صفر}} = [\,\alpha + Fe_3C\,]$$

مثال (2): -

تتركب بنية الفــولاذ فــوق اليوتكتويــدي المحتــوي علــى 1.2% كــاربون مــن [$\alpha + Fe_3C$] والسمنتايت الثانوي المطلوب تحديد كمية [$\alpha + Fe_3C$] وكمية الــسمنتايت الثانوي .

الحل :-

بالاستعانة بالرسم (2-25 ب) وبتطبيق قاعدة الذراع نجد ان :

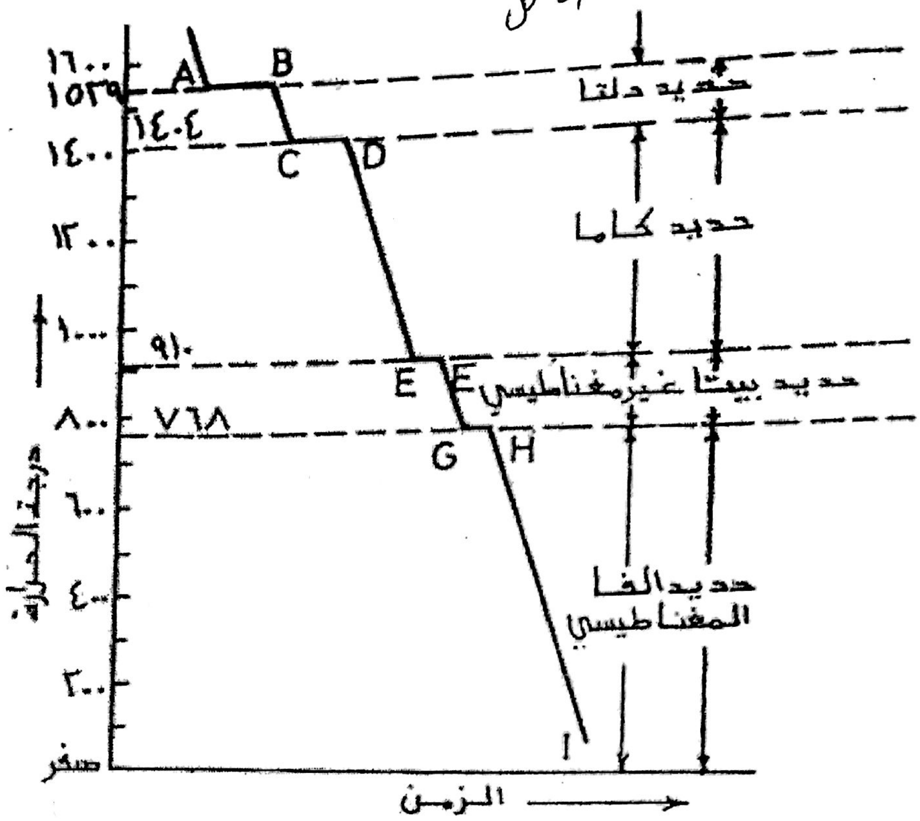
$$\%93.18 = \%100 \times \frac{1.2-6.67}{0.8-6.65} = [\,\alpha + Fe_3C\,]$$

$$\%6.82 = \%100 \times \frac{0.8-1.2}{0.8-6.67} = Fe_3C$$

2-9-7-1 تأصل الأطوار في الحديد :-

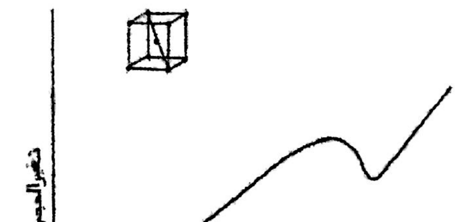
تتغير الشبكة البلورية للمعدن مع تغير درجات الحرارة، وتحدث هذه الظاهرة لبعض المعادن مثل الحديد. ويتخذ الحديد شكل شبكة بلورية من نوع B.C.C (متمركز الجسم) في درجة حرارة المرتفعة وحتى درجة 1400 ^{o}م حيث يعيد بناء نظامه الداخلي ويعدله الى شبكة بلورية نوع F.C.C (متمركز الوجه)، ويستمر كذلك حتى درجة حرارة 910 ^{o}م حيث نجده يغير هذا النظام مرة اخرى ويعود الى الشبكة البلورية B.C.C، ويبقى هذا النسق حتى درجة حرارة المختبر شكل (2-26).

Scanned by CamScanner



الشكل (2-26) منحنى التبريد للحديد النقي

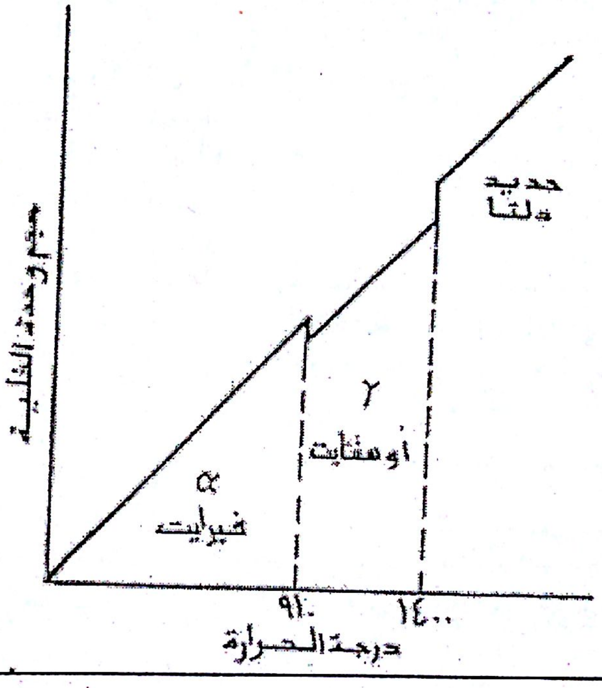
اذا سخنا قطعة من الفولاذ قبل اليوتكتويدي التي تحتوي على نسبة 0.15% كربون ستحدث زيادة في حجمها، وتستمر هذه الزيادة مع ارتفاع درجة الحرارة حتى نصل الى درجة 910 °م حيث نفاجأ بظاهرة غير متوقعة، فعلى الرغم من الاستمرار في تسخين قطعة الفولاذ فانها ستتعرض الى تقلص لحظي شكل (2-27) كما ان درجة حرارة القطعة ستثبت هي الاخرى ولاترتفع لفترة ملحوظة، وبمعنى آخر سيحدث تقلص مفاجيء في الحجم Contraction مع ثبوت درجة الحرارة على الرغم من استمرار انتقال الطاقة الحرارية، وبعد حصول قدر معين من التقلص تعود قطعة الفولاذ و تؤصل الزيادة في الحجم بالمعدل نفسه مع ارتفاع درجة الحرارة، وتستمر هذه الحالة حتى يصل الفولاذ الى درجة 1400 °م حيث نلاحظ حصول تمدد لحظي وان درجة حرارة القطعة ستثبت ولاترتفع في تلك اللحظة شكل (2-28)



الشكل (2-27) تغير الحجم مع درجة الحرارة للفولاذ 0.15% كربون

وبعد حصول قدر معين من التمدد، تعود قطعة الفولاذ وتستمر بزيادة حجمها بالمعدل نفسه حتى يصل الفولاذ الى مرحلة الانصهار. ومع التبريد البطيء لقطعة الفولاذ من حالة الانصهار الى درجة حرارة الغرفة نجد ان الخطوات نفسها ستتكرر ولكن بنظام عكسي، والاختلاف الوحيد هنا هو ان التغيير الفجائي في الحجم سيحدث في هذه الحالة عند درجة حرارة منخفضة بعض الشيء عن تلك التي حدث عندها اثناء التسخين.

ان التقلص المفاجىء للفولاذ على الرغم من مواصلة تسخينه يعني ان هذا الفولاذ يستوعب قدرا ملحوظا من الطاقة الحرارية، وقد استغلت هذه الطاقة في تغيير البنية الداخلية، أي في اعادة الترتيب الذري من B.C.C الى F.C.C .



الشكل (2-28) تأصل الاطوار في الفولاذ

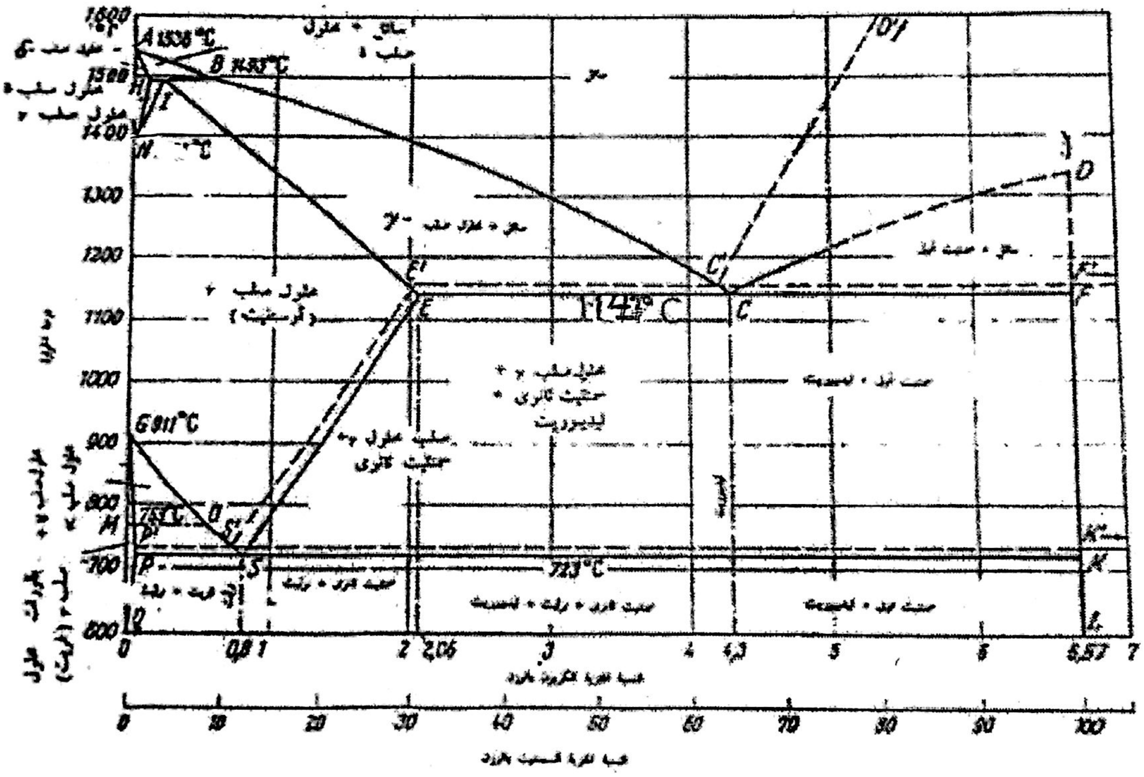
اما الفولاذ الذي يحتوي على نسبة اكثر من 0.8% كاربون (فوق اليوتكتويدي) فانه يتعرض الى التقلص المفاجىء نفسه الذي يمثل التحول الداخلي للذرات من نظام B.C.C الى نظام F.C.C ، الا انه وبعد الأنتهاء من مرحلة التقلص تبدأ الزيادة في الحجم مرة اخرى ولكن بمعدل يقل قليلا عن معدل الزيادة في الحجم الأصلي، ويستمر هذا الحال حتى الوصول الى درجة حرارة معينة نلاحظ بعدها رجوع معدل الزيادة في الحجم الى وضعه الأصلي حيث يبقى كذلك حتى يدخل مراحل التلدين والانصهار.

ان المشاهدات والاستنتاجات التي نحصل عليها من هذه التجارب تفيدنا في التعرف على التراكيب المجهرية ومتابعة التغيرات التي تحدث في البنيان الداخلي لقطعة الفولاذ مع ارتفاع درجة حرارتها.

Scanned by CamScanner

3-7-9-2 مخطط التوازن المستقر وشبه المستقر للحديد والكربون :-

يعد التركيب الداخلي المكون من الحديد و الكرافيت من اثبت صور سبائك الحديد مع الكاربون، فاننا نستطيع ان نسمي نظام الحديد – الكرافيت النظام المستقر (الخطوط المتقطعة في الشكل (2–30)، والنظام شبه المستقر للسبائك بين الحديد – وكربيد الحديد (السمنتايت) (الخطوط المتصلة من الشكل نفسه) وذلك لامكانية السمنتايت عطاء كاربون هو (كرافيت). ومن ملاحظة الشكل الكامل يمكن فهم صور السمنتايت المختلفة، فالبناء الداخلي للسمنتايت هو نفسه في كل الحالات عدا إختلاف في الحجم والشكل الخارجي فقط. فالسمنتايت الأولي ينفصل بصورة مباشرة من السبيكة المنصهرة على يمين النقطة C، وينفصل السمنتايت الثانوي في الحالة الصلبة عند درجة حرارة مابين 1147 °م – 723 °م وبتراكيب 2% – 0.8% كاربون وعلى يمين الخط ES من بلورات المحلول الصلب (γ) (الأوستنايت)، أما السمنتايت الثالث فانه ينفصل تحت درجة حرارة 723 °م من بلورات α (الفيرايت) وبتراكيب من 0.025% – 0.0025% كاربون.



الشكل (2–30) النظام المستقر و شبه المستقر للسبائك الحديد – و الكربون

10–2 الفولاذ (الصلب) Steel :-

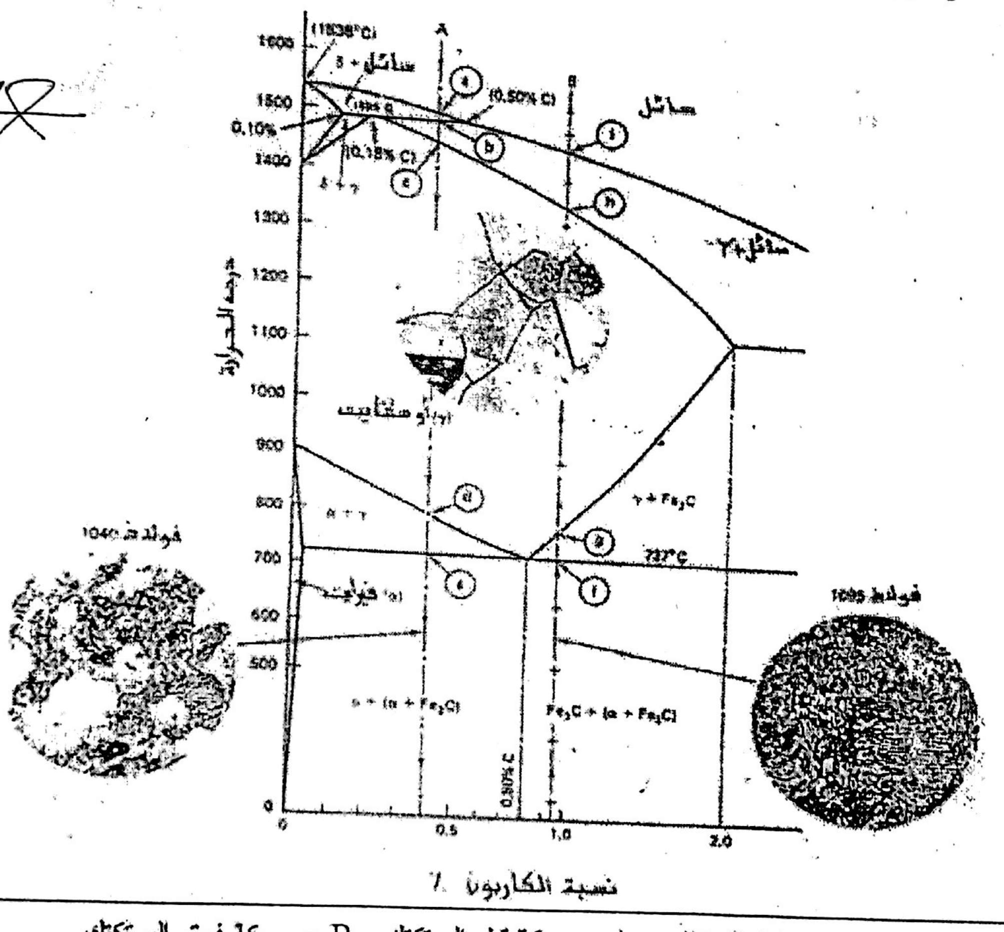
يطلق اصطلاح الفولاذ (الصلب) على السبيكة الحاوية على الحديد مع نسبة من الكاربون لاتتجاوز 2% كربون كما في الشكل (2–31). ويمكن تقسيم الفولاذ الى نوعين أساسيين هما: الفولاذ الكربوني و الفولاذ السبائكي.

1. الفولاذ الكربوني:- وهو الفولاذ الذي يلعب فيه الكاربون دورا أساسيا في تحديد خواصه وبنسبة لاتتجاوز 1.4% كاربون.

وهناك اربعة أنواع من هذا الفولاذ هي :

Scanned by CamScanner

أ. الفولاذ المنخفض الكاربون، ويحتوي على نسبة أقل من 0.35% كاربون، ويمتاز بالمطيلية العالية عند تشكيله على الساخن لذا لديه قابلية جيدة على الخراطة. ويمكن تقسيم هذا الفولاذ الى نوعين، النوع الأول ويسمى الفولاذ الطري الهامد Dead Mild Steel ويحتوي على نسبة من الكاربون ما بين 0.05% الى 0.15% كاربون، وتصنع منه الشرائط المدرفلة على الساخن لغرض الكبس والقضبان والأسلاك في صناعة المسامير، اما النوع الثاني فهو الفولاذ الطري Mild Steel ويحتوي على 0.1% - 0.3% كاربون، وهذه النسبة من الكاربون كافية للحصول على سطوح صلدة بالكربنة ليصبح بالامكان الجمع بين سطوح ذات مقاومة بلى (Wear) عالية وخواص لب متينة، ويستخدم هذا النوع من الفولاذ في الصناعات الأنشائية بسبب مقاومته العالية ومطيليته المنخفضة.



الشكل (2-31) مخطط الفولاذ   A – سبيكة قبل اليوتكتك   B – سبيكة فوق اليوتكتك

ب. فولاذ متوسط الكربون، ويحتوي على نسبة من الكاربون ما بين 0.35% - 0.6% كاربون ويمكن تصليده كليا بالاخماد والمراجعة ليعطي مقاومة جيدة جدا ومتانة عالية.

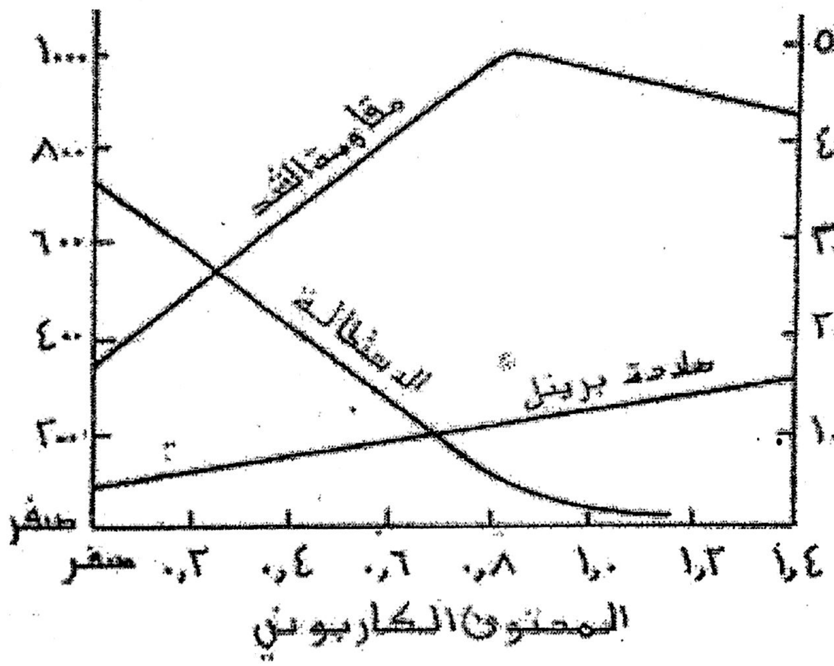
جـ. فولاذ عالي الكاربون، ويحتوي على نسبة من الكاربون مابين 0.6% - 0.8% كاربون، وهذه النسبة العالية من الكاربون تساعد هذا النوع من الفولاذ على معاملته حراريا لتحسين خواصه. ويستعمل هذا النوع في صنع عجلات السكك الحديد والأسلاك ذات المقاومة العالية مثل أوتار البيانو وأسلاك الخياطة وأسلاك النوابض.

Scanned by CamScanner

د. فولاذ العدة الكربوني، ويحتوي على نسبة من 0.8% - 1.4% كاربون، ويستخدم هذا النوع في كثير من الصناعات العامة مثل اللوالب والمثاقب والمطارق والسكاكين وغيرها من العدد المنزلية ويعتبر فولاذ العدة الكربوني محدود الأستخدام بسبب صلادته ومقاومته المنخفضة في درجات الحرارة المرتفعة بالمقارنة مما هو عليه في فولاذ العدة السبائكي.

2-1-10-2 بنية الفولاذ الكاربوني والخواص الميكانيكية :-

تعتمد الخواص الميكانيكية للفولاذ الكاربوني ببطأ على النسب المئوية لمكونات التراكيب المجهرية المختلفة، فيحتوي الفولاذ الكاربوني على الفيرايت والسمنتايت اللذان يكونان البيرلايت، ويعد الفيرايت الحالة اللينة الصعبة الكسر نسبيا، أما السمنتايت فهو الحالة الصلدة الهشة والشكل (2–33) يبين الخواص الميكانيكية والنسب المئوية للكاربون ويلاحظ من الشكل (2–33) ان المقاومة تتناسب خطيا مع زيادة النسبة المئوية للكاربون لغاية 0.8% (بيرلايت 100%) ولا تستمر هذه العلاقة الخطية بعد ذلك نتيجة لظهور السمنتايت في التركيب المجهري. وقد وجد ان صلادة الفولاذ قبل اليوتكتويدي الملدن يمكن تحديدها من المعادلة:



الشكل (2–33) العلاقة بين الخواص الميكانيكية والنسب المئوية للكاربون

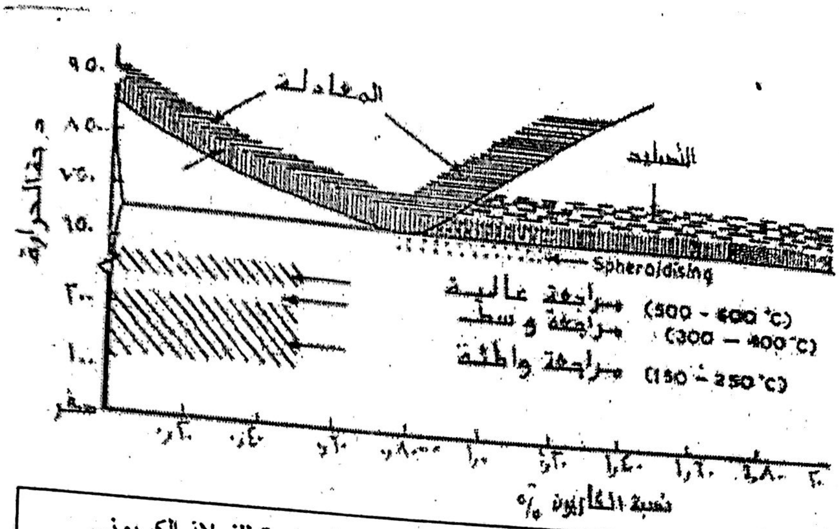
$$[\,M_p\ 180 + M_F\ 80\,]\ 1.3 = H_B$$

اما صلادة الفولاذ فوق اليوتكتويدي فيمكن تحديدها من المعادلة:

$$[\,M_c\ 800 + M_p\ 180\,]\ 1.3 = H_B$$

والقيمة الثابتة 1.3 وضعت لتصحيح الناتج من تأثير الشوائب، اما أرقام الصلادة 80، 180، 800 فهي لكل من الفيرايت والبيرلايت والسمنتايت على التوالي. اما كمية الفيرايت والبيرلايت والسمنتايت فرمزها [M_F و M_p و M_c] على التوالي.

Scanned by CamScanner



الشكل (2–61) توزيع درجات الحرارة للمعاملات الحرارية للفولاذ الكربونى

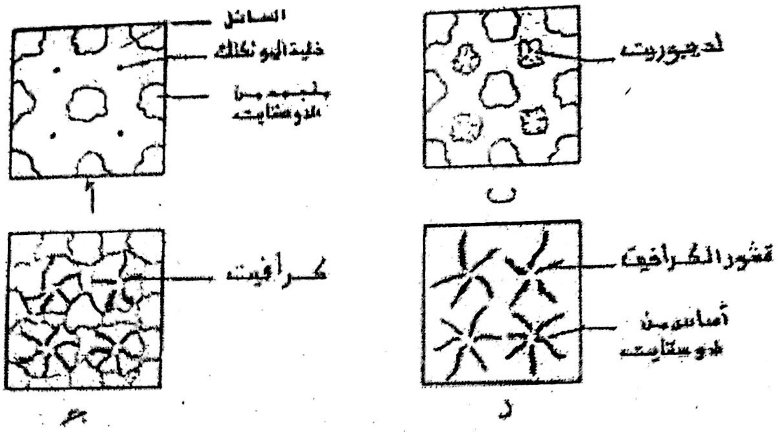
<u>2–12 حديد الزهر (cast Iron) :–</u>

تسمى سبائك الحديد الحاوية على نسب كاربون من 2% الى 6.67% حديد الزهر ، ومن الناحية العملية يحتوي حديد الزهر 2.5% – 4.5% كاربون , لذلك يلعب التفاعل اليوتكتيكي الذي يحدث عند درجة حرارة 1147 مْ دورا مهما في تكوين البنية المجهرية .

فعند متابعة تبريد سبيكة من الحديد تحتوي على نسبة 2.5% كاربون شكل (2–24) يتبين لنا ان نواة الاوستنايت تتكون عند درجة 1317مْ , وعند استمرار التبريد ستزداد كمية الاوستنايت الى ان تصل الدرجة 1147مْ حيث يتكون المحلول الجامد اليوتكتيكي من السائل المتبقي , وهو محلول يحتوي على كتل من الاوستينايت في اساس من السمنتايت شكل (2–62) وعند درجة 723مْ سيتحول الاوستنايت كما معلوم الى البيرلايت وعليه فأن البنية النهائية ستتكون من جزر كبيرة من البيرلايت زائدا يوتكتي من جزر بيرلايتية في اساس من السمنتايت تدعى الليديبوريت , وتتصف هذه البنية بخواص عديدة اهمها الصلادة العالية والمطيلية المنخفضة علاوة على مقاومة الشد المنخفضة نسبيا ، وعليه فان مثل هذه البنية لا تشكل بالحدادة و لاتسحب وتكبس بل تشكل بالسبك . وبصورة عامة يمكن تصنيف حديد الزهر الى ثلاثة انواع هي :

أ- <u>حديد الزهر قبل اليوتكتك</u> :–

تتراوح نسبة الكاربون في هذا النوع من (2 الى 4.3)% ، وتتكون بنيته عند 1131مْ من بلورات الاوستنايت + الليديبوريت , ويمكن تحديد نسبة كل من هذين المكونين بتطبيق قاعدة الذراع .



الشكل (٢ـ٦٢) تبريد حديد الزهر قبل اليوتكتك ٢,٥٪ كاربون

الشكل (2-62) تبريد حديد الزهر قبل اليوتكتك 2,5% كاربون
أ- تكون خلايا اليوتكتك
ب-ب- نمو اللديبوريت
ج- تفاعل يوتكتكى شبه متكامل مع نجوم الكرافيت
د- تجمد متكامل مع نجوم الكرافيت في اساسين الاوستنايت

مثال :-

حديد زهر يحتوي على 3% كاربون تتكون بنيته عند التجمد في درجة 1147مْ من الليديبويت W_{Led} والاوستينايت W_{γ} , جد النسبة المئوية لهذين المكونيين ؟

الحل :-

من مخطط الحديد والكاربون شكل (2-24) نحصل على :

$$W_{Led} = \frac{3-2}{4.3-2} * 100\% = 43.5\%$$

$$W_{\gamma} = \frac{4.3-3}{4,3-2} * 100\% = 56.5\%$$

وعند انخفاض درجة الحرارة من 1147مْ الى اعلى من 723مْ فأن قسما من الاوستينايت سيفرز سمنتايت ثانوي , وعند درجة 723مْ سيتكون البيرلايت , وعندها ستتكون البنية من الليديبوريت والبيرلايت والسمنتايت الثانوي , ويمكن تحديد نسبة كل منها بتطبيق قاعدة الذراع ، فمثلا تتكون بنية الزهر الحاوي على 3% كاربون من 11.3% سمنتايت ثانوي طليق و 45.2% بيرلايت .

Scanned by CamScanner

ب- **حديد زهر يوتكتك :-** وتتكون بنية من الليديبوريت لايوجد فيه
هو حديد يحتوي على 4.3% كاربون ، وتتكون بنية من الليديبوريت لايوجد فيه طور زائد . فعند درجة حرارة 1147مْ تتكون البنية من الاوستنايت مع الـسمنتايت ، وعند 723 مْ تتكون البنية من البيرلايت مع السمنتايت .

ج- **حديد زهر فوق اليوتكتك :-**
ويحتوي على نسبة أعلى من 4.3% وادنى من 6.67% كـاربون ، وتتكـون بنيته في درجة حرارة 1147مْ من بلورات من السمنتايت الاولي و الليديبوريت .

مثال :-
حديد زهر يحتوي على 5% كاربون تتكون بنيته في درجـة حـرارة 1131مْ مـن الليديبوريت والسمنتايت الاولي جد النسبة المئوية لهذين المكونين ؟

الحل :-
من **مخطط الحديد** – الكاربون شكل (2–24) نحصل على

$$W_{Led} = \frac{6.67 - 5}{6.67 - 4.3} \cdot 100\ \% = 70.46\ \%$$ ليديبوريت

$$W_{Fe_3C_1} = \frac{5 - 4.3}{6.67 - 4.3} \cdot 100\ \% = 29.54\ \%$$ سمنتايت اولي

وعند درجة حرارة 723مْ تتكون بنية الزهر من السمنتايت الاولـي والليـديبوريت الذي يتكون من السمنتايت الثانوي والسمنتايت اليوتكتك والبيرلايت وسيكون السمنتايت الـذي يتكون في بنية حديد الزهر غير ثابت ويتحلل عند درجات الحرارة العالية اذا سـمح الوقـت بذلك واذا ترك ليبرد ببطئ الى عناصره الاساسية وهي الكاربون والحديد وحـسب المعادلـة الاتية :

$$Fe_3C \Longrightarrow 3Fe + C$$

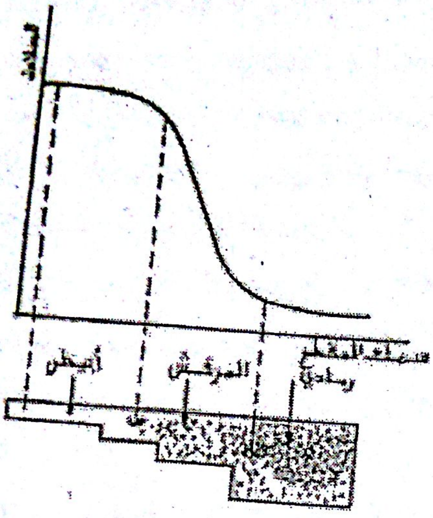
فالكاربون الحر المنفصل سيكون بصورة كرافيت متبلور, لذا فأن التبريد البطـيء يعـد مـن العوامل الاساسية في انفصال الكرافيت الذي يكون على اشكال مختلفة منها الرقائقي ومنهـا الكروي .
وعادة يكون لون المكسر داكنا (رمادي اللون)ويسمى حديد الزهر الرمادي وهو زهر يتصف بالليونة النسبية وله قابلية جيدة للتشغيل بالمكائن .
اما اذا كان الكاربون متحدا على شكل سمنتايت فأن حديد الزهر سيكون كما اسـلفنا صلدا وهشا وغير قابل للتشغيل بالمكائن .
ويكون لون المقطع (المكسر) ابيض لذا يسمى حديد الزهر الابيض . امـا اذا تحلل جزء من السمنتايت الى كرافيت فسيظهر على سطح حديد الزهر المكسور بشكل مرقش يسمى بحديد الزهر المرقش Mottled Cast Iron ومما تقدم نستنتج ان صورة الكاربون تحدد نوع حديد الزهر الامر الذي يستدعي دراسة العوامل المؤثرة في صور الكاربون . ومـن اهـم هـذه العوامل هي :

1- **معدل التبريد :-**

اذا كان معدل التبريد بطيئاً فأنه يؤدي الى تكون الكرافيت وبالتالي تكون حديد الزهر رمادي , اما اذا كان سريعاً فأن السمنتايت سيستقر ويتكون بذلك حديد الزهر الابيض . ويعتمد معدل التبريد على نوع مادة القالب وعلى سمك المقطع . فتحتوي

Scanned by CamScanner

المسبوكة على الزهر الابيض اذا كان المقطع رقيقاً , بينما تحتوي على الزهر الرمادي اذا كان المقطع سميكاً والشكلان (2-63) و (2-64ب) يبينان ان الكرافيت يزداد اكتمالاً كلما زاد سمك المسبوك أي مع انخفاض معدل التبريد .



الشكل (2-63) تأثير سمك المقطع على عمق التبريد المفاجئ لحديد الزهر الرمادى

Scanned by CamScanner

بعض الأسئلة الهامة:

التمرين الأول: أجب بـ (نعم) أمام الإجابة الصحيحة وبـ (لا) أمام الإجابة الخاطئة :

1- تختلف خواص الأطوار المختلفة في مخطط الحديد والكربون ( )

2- أقصى نسبة للكربون يمكن إذابتها في الحديد تساوي 10% ( )

3- تتحول السبيكة من طور سائل إلى طور سائل وطور جامد عند نقطة اليوتيكتيك ( )

4- التركيب اليوتيكتويدي معناه تحول طور سائل إلى طورين كلاهما صلب ( )

5- نسبة الكربون في الحديد الزهر أكبر من 2.11% ( )

6- موقع طور الأوستنيت γ في مخطط الحديد والكربون في درجات الحرارة العالية نسبيا ( )

7- طور السيمنتيت Fe_3C طور له بنية بلورية من نوع FCC ( )

8- نسبة الكربون في طور ألفا فريت α عالية جداً ( )

9- يوجد طور واحد في التركيب اليوتيكتويدي والذي يطلق عليه طور البيرليت ( )

10- نسبة الكربون في التركيب فوق اليوتيكتويدي أكبر من 0.77% وأقل من 2.11% ( )

الاجابة:

التمرين الأول:

1- تختلف خواص الأطوار المختلفة في مخطط الحديد والكربون (نعم)

2- أقصى نسبة للكربون يمكن إذابتها في الحديد تساوي 10% (لا)

3- تتحول السبيكة من طور سائل إلى طور سائل وطور جامد عند نقطة اليوتيكتيك (لا)

4- التركيب اليوتيكتويدي معناه تحول طور سائل إلى طورين كلاهما صلب (لا)

5- نسبة الكربون في الحديد الزهر أكبر من 2.11% (نعم)

6- موقع طور الأوستنيت γ في مخطط الحديد والكربون في درجات الحرارة العالية نسبيا (نعم)

7- طور السيمنتيت Fe_3C طور له بنية بلورية من نوع FCC (لا)

8- نسبة الكربون في طور ألفا فريت α عالية جداً (لا)

9- يوجد طور واحد في التركيب اليوتيكتويدي والذي يطلق عليه طور البيرليت (لا)

10- نسبة الكربون في التركيب فوق اليوتيكتويدي أكبر من 0.77% وأقل من 2.11% (نعم)

Scanned by CamScanner

التمرين الثاني: اختر الإجابة الصحيحة من بين الإجابات الثلاثة المقترحة:

1- تتراوح نسبة الكربون في الصلب من:

أ- 0% إلى 2.11%.

ب- 0.3% إلى 0.6%.

ج- 2.11% إلى 6.67%.

2- استناداً للمخطط الاتزان الحراري للحديد والكربون وبالتحديد في النقطة (0.5% كربون ودرجة حرارة 1130°C) فإن الطور المتواجد هو:

أ- سائل + طور الأوستنيت γ.

ب- طور الأوستنيت γ.

ج- طور ألفا فريت α + البيرليت.

3- الفريت هو:

أ- أحد الأطوار في مخطط الاتزان الحراري للحديد والكربون.

ب- الحديد النقي.

ج- هو الصلب عالي الكربون.

4- يحتوي البرليت على:

أ- طور واحد.

ب- طورين متجمدين.

ج- طورين أحدهما جامد والثاني سائل.

5- الأوستنيت هو:

أ- طور في مخطط الحديد والكربون تركيبه البلوري BCC.

ب- الصلب الذي يحتوي على النيكل.

ج- طور في مخطط الحديد والكربون تركيبه البلوري FCC.

6- نمط الخلية الوحدية للطور ألفا فريت α هو:

أ- مكعبي مركزي الوجه (FCC).

ب- مكعبي مركزي الجسم (BCC).

ج- سداسي متشور (HCP).

Scanned by CamScanner

التمرين الثاني:

1- أ.

2- ب.

3- أ.

4- ب.

5- ج.

6- ب.

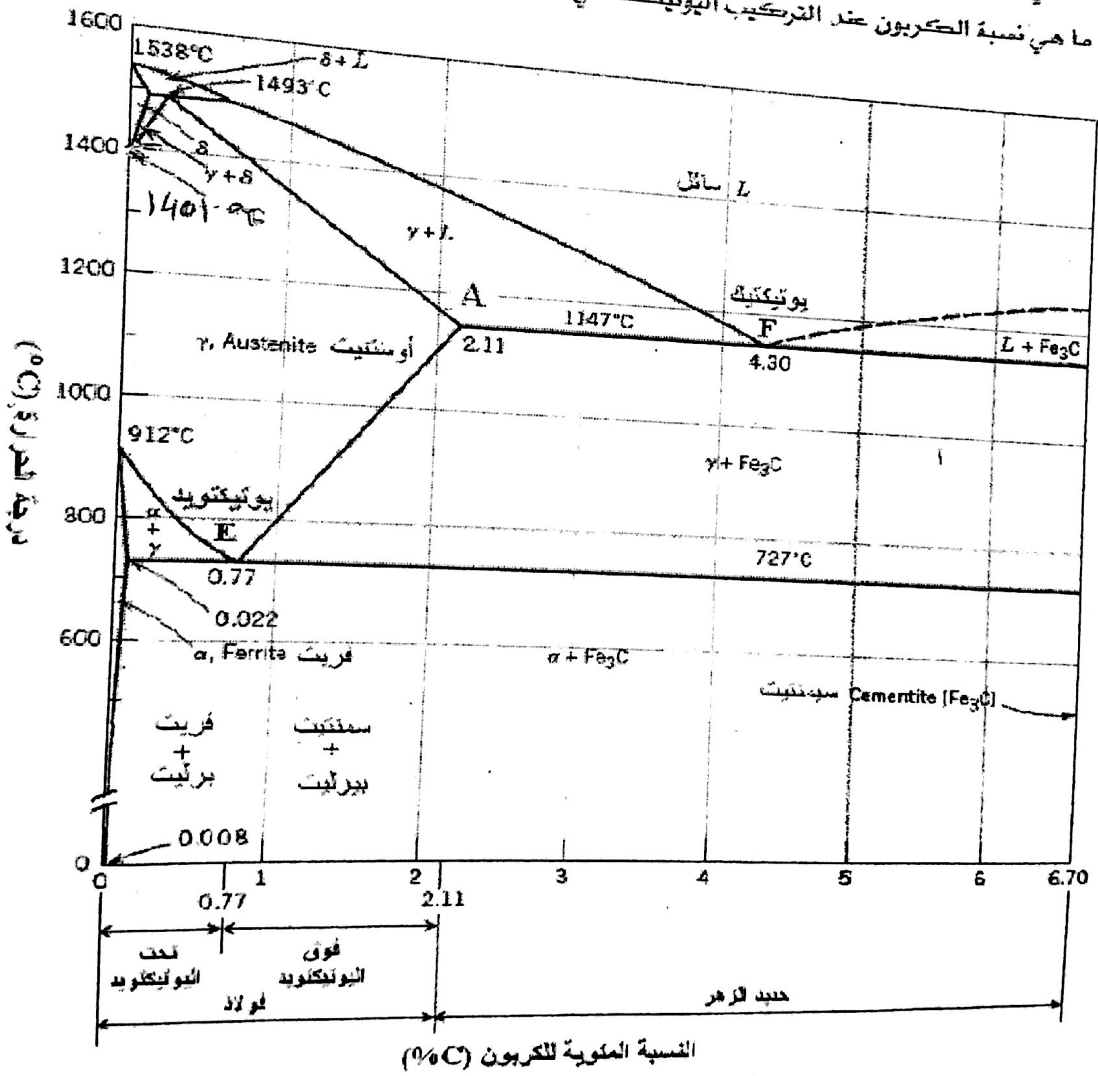
التمرين الثالث: الشكل التالي يمثل مخطط الاتزان الحراري للحديد والكربون.

1- ما هي أعلى نسبة كربون يمكن إذابتها في الحديد؟

2- ما هي نسبة الكربون ونسبة الحديد عند النقطة A؟

3- ما هي الأطوار الموجودة عند نسبة الكربون 3% و درجة الحرارة 1200°C؟

4- ما هي نسبة الكربون عند التركيب اليوتيكتيكي (Eutectic)، وما هي خصائص هذا التركيب؟



الشكل (6.6): مخطط الاتزان الحراري للحديد والكربون.

Scanned by CamScanner

التمرين الثالث:

1- أعلى نسبة كربون يمكن إذابتها في الحديد هي 6.7%.

2- نسبة الكربون عند النقطة **A** هي 2.11%.

ونسبة نسبة الحديد عند النقطة **A** هي: $100\% - 2.11\% = 97.89\%$

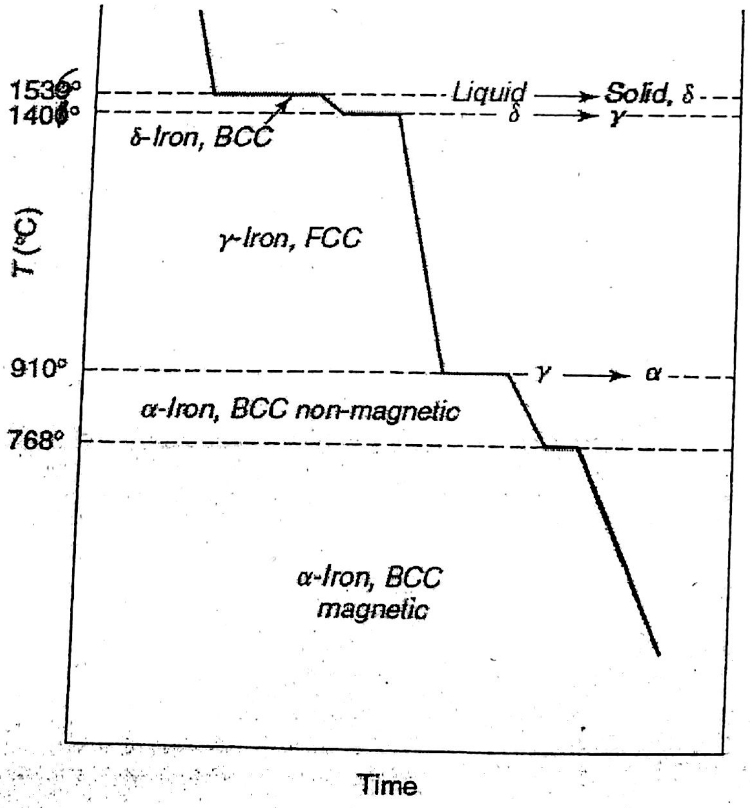
3- الأطوار الموجودة عند نسبة الكربون 3% و درجة الحرارة 1200°C هي طور سائل والأوستنيت γ.

4- نسبة الكربون عند التركيب اليوتيكتكي (Eutectic) هي 4.30%. خصائص هذا التركيب أنه يتواجد به ثلاث أطوار مختلفة في آن واحد هي:

- الطور السائل.
- طور الأوستنيت γ.
- طور السيمنتيت Fe_3C.

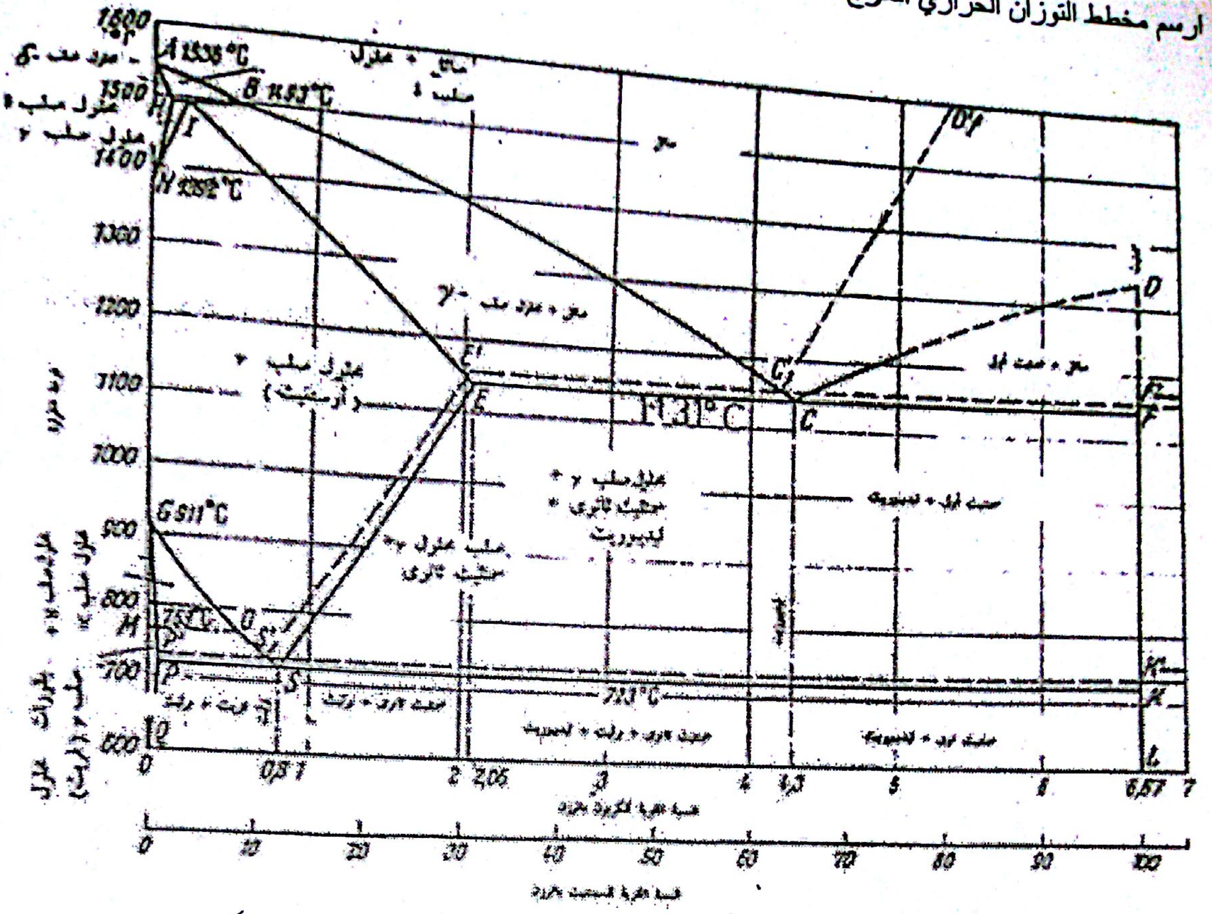
عملية التجمد في التركيب اليوتيكتكي عبارة عن نقطة وليس هناك مدى تجمد كما في بقية المخطط أي أن السبيكة تمر مباشرة من طور سائل إلى طوري جامدين دون المرور بطورين أحدهما جامد والثاني سائل.

ارسم منحني التبريد للحديد النقي:



Scanned by CamScanner

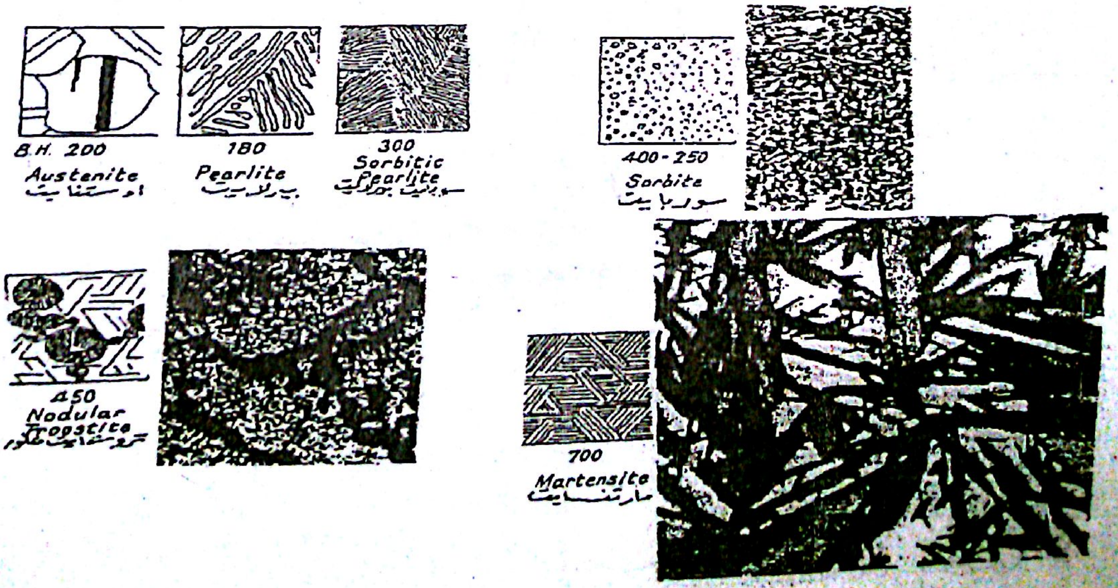
ارسم مخطط التوزان الحراري الحرج للحديد والكربون وضع عليه الأطوار وعناصر البنية



الشكل (2-30) النظام المستقر و شبه المستقر للسبائك الحديد – و الكربون

ما هي البنيات المتوقعه نتيجة تبريد الفولاذ من البنية الاوستنتية بسرعات تبريد مختلفة:

الحل : أوستنيت ← برليت ← بينيت ← سوربايت ← تروستايت ← مارتنسيت كما هو موضح بالشكل:



Scanned by CamScanner

مسائل على المخطط.

- عينة من الفولاذ الهيبويوتكتويدي نسبة البرليت فيها 60% ما نسبة الحديد في هذه الخليطة وما عناصر البنية والاطوار المشكلة لهذه الخليطة ومانسبتها؟

- عينة من الفولاذ الهيبويوتكتويدي نسبة الكربون فيها 0.5% ما نسبة الحديد في هذه الخليطة . ماهي عناصر البنية المشكلة لهذه الخليطة وما نسبتها . ماهي الأطوار المشكلة لهذه الخليطة ومانسبتها؟

- عينة من الفولاذ الهيبريوتكتويدي نسبة البرليت فيها 40% ما نسبة الكربون في هذه الخليطة وما عناصر البنية والاطوار المشكلة لهذه الخليطة ومانسبتها؟

- عينة من الفولاذ الهيبريوتكتويدي نسبة الكربون فيها 1.5% ما نسبة الحديد في هذه الخليطة . ماهي عناصر البنية المشكلة لهذه الخليطة وما نسبتها . ماهي الأطوار المشكلة لهذه الخليطة ومانسبتها؟

Scanned by CamScanner